

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Хоперскова Александра Валентиновича

на диссертационную работу Воробьева Эдуарда Игоревича «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» (в виде научного доклада), представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

### **Актуальность темы**

Актуальность теоретического исследования динамических процессов в многокомпонентных протопланетных диска обусловлена прежде всего прогрессом данных наблюдений, особенно, в связи открытием большого числа экзопланет с самыми различными физическими характеристиками, которые часто плохо согласуются со свойствами Солнечной системы. Это уже потребовало определенного пересмотра теорий за последние 25 лет, и поскольку свойства планет определяются условиями в протопланетном диске, то современная самосогласованная теория образования звезд и протопланетных дисков в условиях активного взаимодействия с внешней средой должна объяснять всю совокупность данных об экзопланетах, которые, очевидно, еще не полны. Совокупность исследований Э.И. Воробьева в этом направлении является значимым научным достижением.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, оценка достоверности полученных результатов**

Научные положения, выводы и рекомендации логически связаны, целостны, подтверждаются сравнительным анализом с результатами других авторов в соответствующих предельных случаях, а также вычислительными экспериментами Автора. Основные результаты, изложенные в диссертации, представляются достоверными.

Все результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих изданиях и имеют значительное цитирование.

## **Новизна диссертационного исследования**

Разработан новый численный гидродинамический комплекс для моделирования формирования и длительной эволюции протозвездных и протопланетных дисков, учитывающий основные физические факторы, определяющие динамику газа и пыли. Это позволило исследовать гравитационную неустойчивость и фрагментацию газо-пылевых дисков для описания процесса формирования планет-гигантов.

Впервые показано, что переменная протозвездная аккреция с эпизодическими вспышками не является особенностью только дисков солнечной металличности, но может проявляться в дисках с металличностью в 10–100 раз ниже солнечной.

Соискатель установил зависимость частоты вспышек аккреции и светимости от массы протозвезды в рамках модели магниторотационной неустойчивости диска. Сделан вывод, что вспышки отсутствуют у звезд с конечной массой меньше 0.2 от Солнечной массы.

Автор впервые показал, что газодинамические модели гравитационно неустойчивых дисков способны решать проблему светимости, согласно которой средняя светимость протозвезд в молодых очагах звездообразования на порядок меньше, чем соответствующее значение, предсказываемое упрощенными аналитическими моделями сферического коллапса протозвездных облаков.

Получены новые результаты о важности взаимодействия протопланетного диска с внешним окружением, существенно влияя на пространственную морфологию и эволюцию протопланетных дисков.

Впервые изучены особенности динамики сгустков, способных покидать протопланетный диск при различных условиях. Важным новым результатом представляется демонстрация возможности формирования планет-гигантов и коричневых карликов на орбитальных расстояниях в несколько сотен астрономических единиц.

## **Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования**

Разработан численный гидродинамический комплекс FEOSAD, который активно используется для моделирования газопылевых дисков как в России, так и за рубежом. Важным для практического использования является обобщение ПО FEOSAD на учет магнитного поля. Программное обеспечение позволяет исследовать формирование и длительную эволюцию протозвездных и протопланетных дисков из газовой и пылевой компонент с учетом основных физических факторов. В частности, на основе модели FEOSAD частично или полностью защищены три кандидатские диссертации.

Определены наблюдательные проявления, возникающие в результате развития гравитационной неустойчивости и фрагментации газо-пылевых дисков. Получены новые данные о влиянии вспышечной активности протозвездной аккреции у молодых звезд на динамическую и химическую эволюцию протопланетных дисков, а также на свойства молодых звезд до главной последовательности. Соискатель предложил объяснение феномена вспышек светимости у молодых звезд солнечной массы типа FU Ориона в результате приливного разрушения газопылевых сгустков и последующей аккреции их вещества на звезду.

Предложенная Э.И. Воробьевым модель приливного разрушения газопылевых сгустков может являться достаточно универсальным механизмом вспышек аккреции и светимости для широкого спектра молодых звездных объектов, включая массивные звезды и звезды низкой металличности. Важным для теории образования планет и звезд представляется вывод, что гравитационная фрагментация протопланетного диска может приводить к формированию планет-гигантов и коричневых карликов на орбитальных расстояниях от нескольких десятков до несколько сотен астрономических единиц.

На основе результатов Соискателя, вошедших в данную диссертационную работу, были поддержаны и выполнены заявки на наблюдения некоторых молодых звездных объектов на интерферометре ALMA и телескопе с адаптивной оптикой Subaru.

## *Замечания по диссертации*

- 1) Используемая двумерная (плоская) модель газового диска основана на системе уравнений (1) - (3), которая отличается от трехмерной с точностью до формальной замены: объемная плотность на поверхностную плотность; давление на величину вертикально проинтегрированного давления. Такой подход является полным аналогом так называемой модели мелкой воды. Академик А.М. Фридман первым обратил внимание, что последовательный и строгий переход от 3D к 2D модели посредством интегрирования вдоль  $z$ -координаты уравнений динамики газа во внешнем гравитационном поле с учетом самогравитации приводит к новым слагаемым в уравнениях движения газа в дисковых подсистемах. Этот вопрос подробно обсуждался в книге Фридмана А.М., Горькавого Н.Н. Физика планетных колец — М.: Наука, 1994. С.282 (Фридман А.М., Хоружий О.В. Приложение 1) и в последующих работах Алексея Максимовича с разными соавторами. Еще ранее, было показано, что переход к «плоским» уравнениям требует использования модифицированного показателя адиабаты. Речь идет о гидродинамических уравнениях даже без переноса тепла. Следовало бы привести какие-то оценки этих факторов, и как минимум обсудить указанные проблемы.
- 2) Следовало бы более подробно определить личный вклад Соискателя в работах, опубликованных с соавторами, не ограничиваясь фразой «в совместных работах вклад автора является либо ведущим, либо равным вкладу других авторов».
- 3) В модели охлаждения/нагрева в формуле (15) входит шкала высоты газового диска  $H_g$ , которая не определяется в работе. Очевидно, что толщина газового слоя должна являться функцией координат и времени.

- 4) Определяемый в (22) адаптивный  $\alpha$ -параметр является функцией координат и времени (через плотности). Почему тогда не учитывать зависимость от температуры? Каков физический смысл этого параметра и такого способа его определения? Насколько такой подход моделирования чувствителен к выбору значений  $\alpha_{MRI}$  и  $\alpha_{dz}$ , которые характеризуются сами большой неопределенностью (и должны определяться на основе каких-то наблюдений)? Причем, судя по стр.35, параметры зависят от термодинамических величин в диске.
- 5) Следовало бы придерживаться однотипного оформления списка литературы. Встречаются разные стили такого оформления.

Данные замечания не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и все основные научные результаты, сформулированные в работе. Работа написана грамотно и в достаточной степени иллюстрирована. Описывается дальнейшее развитие темы диссертации в направлении разработки трехмерной численной гидродинамической модели для моделирования формирования и эволюции газопылевых дисков.

Диссертационное исследование, безусловно, соответствует паспорту специальности 01.03.02, в частности, пункту 1 (Исследование физических процессов, связанных с генерацией электромагнитного излучения, распространения и поглощения излучения в космических средах) и 2 (Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд), межпланетной, околозвездной среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях). Все результаты являются оригинальными, имеют высокую практическую значимость и могут быть использованы в ведущих научных учреждениях России и зарубежных центрах, в которых ведутся соответствующие исследования.

Считаю, что представленная диссертация (в виде научного доклада) является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

В работе разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области исследования протопланетных и протозвездных дисков. Диссертация представляет собой логически выдержанное самостоятельное научное исследование, выполненное на актуальную тему, обладающее внутренним единством и содержащее новые научные результаты и положения, выдвигаемые для защиты. Результаты опубликованы в 35 статьях в научных журналах, индексируемых в Web of Science, все входят в первый квартиль (WoS: Q1). Работы опубликованы в период 2012-2021 гг.

Считаю, что диссертация Воробьева Эдуарда Игоревича «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» в виде научного доклада удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «Астрофизика и звездная астрономия».

Официальный оппонент:

Хоперсков Александр Валентинович,  
зав. кафедрой информационных систем и  
компьютерного моделирования, ФГАОУ ВО  
Волгоградский государственный университет,  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
специальность 01.03.02.



А.В. Хоперсков

Почтовый адрес: 400062 Волгоград,  
пр. Университетский, 100; ВолГУ  
e-mail: [infomod@volsu.ru](mailto:infomod@volsu.ru), [www.volsu.ru](http://www.volsu.ru)  
тел.: 8(8442) 47 60 51

15.04.2022

